

Вычисленные значения параметров трёхобмоточных трансформаторов приведены далее.

$S_{\text{ном}}$, МВА	63	$u_{кВ}$, %	10,5	$P_{кН}$, кВт	93	$L_{Н}$, Гн	0,0004
$U_{В}$, кВ	115	$u_{кС}$, %	0	$L_{В}$, Гн	0,0702	$R_{Н}$, Ом	0,0085
$U_{С}$, кВ	38,5	$u_{кН}$, %	6,5	$R_{В}$, Ом	1,55	$L_{С}$, Гн	0
$U_{Н}$, кВ	11	$P_{кВ}$, кВт	155	$L_{С}$, Гн	0	$R_{С}$, Ом	0,174
$P_{кВС}$, кВт	310	$P_{кС}$, кВт	155				

3. Параметры кабельных линий

В табл. А2 приведены параметры кабельных линий при равенстве параметров прямой и нулевой последовательности.

Последовательность	Длина, км	R , Ом/км	X , Ом/км	b , мкСим/км
0	3,71	0,100	0,187	81,681
1	3,71	0,100	0,187	81,681
0	4,24	0,0464	0,172	109,956
1	4,24	0,0464	0,172	109,956



А. И. Ширковец



А. А. Лаптева

Аналитическая оценка опасности и защита от феррорезонансных процессов в распределительной сети 6 – 10 кВ промышленного предприятия

ШИРКОВЕЦ А. И., канд. техн. наук

ООО «Болид»; 630015, г. Новосибирск, Электrozаводская ул., 2, корп. 6
nio_bolid@mail.ru

ЛАПТЕВА А. А., Новосибирский государственный технический университет

630073, Новосибирск, просп. Карла Маркса, 20, корп. 2
aytalina14@mail.ru

Выполнена инженерная оценка опасности возникновения явления группового феррорезонанса в зависимости от значения ёмкостного тока и числа электромагнитных трансформаторов напряжения применительно к кабельным сетям 6 – 10 кВ крупного промышленного предприятия металлургической отрасли. В программном комплексе Matlab Simulink на основе зарегистрированных в натурном эксперименте параметров замыканий на землю (осциллограмм) разработана математическая модель для расчёта переходных процессов с учётом известных характеристик намагничивания установленных трансформаторов напряжения. Выявлены опасные с точки зрения развития устойчивого или неустойчивого феррорезонанса участки сети. Рассмотрены основные меры подавления феррорезонанса, основанные на изменении конструкции трансформаторов напряжения и оптимизации схемных решений с дополнительным демпфированием. Определены требуемые значения активного сопротивления, включаемого в нейтраль, для эффективного решения поставленной задачи.

Ключевые слова: замыкание на землю, групповой феррорезонанс, трансформаторы напряжения, перенапряжение, математическое моделирование.

Причина возникновения феррорезонансных процессов (ФРП) в электрических сетях — возникновение несимметрии в контуре нулевой последовательности, что вызывает появление напряжения смещения нейтрали. В результате возмущения фазная ёмкость относительно земли получает избыточ-

ный заряд, который после исчезновения несимметрии стекает через заземлённые обмотки высшего напряжения всех трансформаторов напряжения (ТН), включённых в схему. В сети с изолированной нейтралью это единственный путь стекания избыточного заряда. В зависимости от начальных условий, соот-

ношения ёмкости сети на землю и индуктивности ТН, т. е. положения «рабочей точки» на его кривой намагничивания, процесс разряда может быть либо затухающим, либо незатухающим. В первом случае происходит неустойчивый ФРП, во втором — устойчивый.

В электрических сетях среднего напряжения с малыми ёмкостными токами однофазного замыкания на землю (ОЗЗ), эксплуатируемых в режиме изолированной нейтрали, в ряде случаев создаются условия возникновения ФРП с протеканием сверхтоков в первичных обмотках ТН. Однако возникновение ФРП не исключено и в сетях 6 – 10 кВ с большим током ОЗЗ при значительном количестве ТН электромагнитного типа с заземлёнными первичными обмотками. Условия возбуждения ФРП определяются в зависимости от текущего значения ёмкостного тока, числа и типов измерительных трансформаторов напряжения в электрически связанной сети и режима заземления нейтрали.

Основные причины возникновения феррорезонансных перенапряжений в сетях 6 – 10 кВ — отключение ОЗЗ, перемежающиеся дуговые замыкания на землю, коммутации холостых шин ёмкостью примерно до 100 нФ с появлением «ложной земли» [1 – 4].

Повреждение трансформаторов напряжения

К одной из основных причин повреждения ТН относятся броски тока намагничивания в первичных обмотках ТН, что особенно характерно для процесса перемежающегося дугового ОЗЗ. Установлено, что такие токи возникают при ФРП, наиболее часто имеющем частоту субгармоник $50n$ ($n = 1/2, 1/3, \dots$). Действующее значение этих токов значительно превышает максимально допустимое по тепловой устойчивости изоляции обмотки значение в 0,12 – 0,20 А для трансформаторов напряжения 6 – 10 кВ [2].

Устойчивые ФРП, сопровождающиеся бросками токов в первичных обмотках ТН, могут приводить к каскадному повреждению ТН. Вследствие высоких уровней токов в первичных обмотках ТН происходит нарушение тепловой стойкости обмоток высшего напряжения и лавинообразный пробой по внутренней витковой изоляции с перекрытием основной изоляции ТН. В ряде случаев наблюдается разлом литой изоляции ТН (рис. 1). Переход дефектов в стадию быстрого развития с представленным характерным повреждением литой изоляции ТН вызван сильной разрядной активностью в местах неплотного прилегания литого корпуса к изолированной обмотке высшего напряжения. Технологически достичь устранения локализованных воздушных полостей в этих местах крайне сложно, а испытания ТН



Рис. 1. Повреждение с перегоранием первичной обмотки и разломом корпуса ТН 10 кВ с литой изоляцией

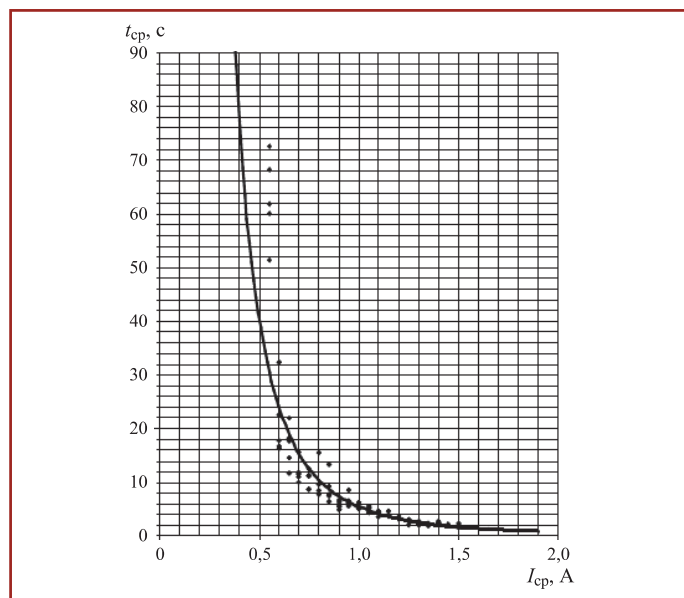


Рис. 2. Ампер-секундная характеристика защитного предохранительного устройства повреждённых ТН с резисторами 11 Ом/0,25 Вт/250 В в качестве плавкой вставки

на частичные разряды, которые помогли бы выявить недопустимые дефекты ещё на выходе из производства, введены относительно недавно и регламентированы ГОСТ 1983–2015 [5].

Феррорезонансные колебания в сети с ТН электромагнитного типа, сопровождающиеся насыщением сердечников, способны привести к неселективному срабатыванию защиты от замыканий на землю, а повреждение ТН — к отказу защит, использующих сигналы напряжения, отказу автоматики ввода резерва, веерному отключению фидеров. В процессе ОЗЗ на отключение может подействовать только защита повреждённого присоединения, после отключения ОЗЗ могут быть отключены одно или более неповреждённых присоединений. До отключения повреждённой линии и возникновения ФРП токи в цепях ТН близки к нулю, после отключения и возникновения ФРП — токи в ТН и в присоединениях с ТН резко возрастают и могут достигать нескольких ампер. Соответствующие защиты неповреждённых линий могут подействовать на отключение.

При ёмкостных токах ОЗЗ до 20(30) А, т. е. не превышающих регламентированные значения в сетях 10 (6) кВ для введения компенсации согласно ПУЭ, а также при соблюдении условий возникновения феррорезонанса, он может развиваться в сети с большим числом ТН (примерно до 20 трёхфазных или таком же количестве комплектов однофазных ТН), что в некоторых случаях приводит к каскадному, но неодновременному выходу ТН из строя [3]. При таком групповом ФРП, как правило, проводится контроль изоляции только тех ТН, которые визуально не были идентифицированы как повреждённые. Однако подобным образом

подгорание обмотки высшего напряжения трансформатора не выявляется, что приводит в дальнейшем к вводу в эксплуатацию одновременно не только исправных ТН взамен сгоревших, но и ТН с внутренними повреждениями. Это провоцирует их поочерёдный выход из строя в течение нескольких недель или месяцев в зависимости от частоты ОЗЗ в сети.

Рассмотрим пример. В сетях 6 – 10 кВ промышленного предприятия эксплуатируются ТН с литой изоляцией, оснащённые предохранительными устройствами. За 4 года зафиксировано свыше 10 случаев их повреждений, в том числе с разломами корпуса (рис. 1), перегоранием предохранителей и срабатыванием защиты минимального напряжения, а также отключением отходящих присоединений с мощными технологическими электродвигателями из-за несимметрии напряжений. Выявлены неоднократные витковые замыкания в высоковольтных обмотках ТН, а также снижение их сопротивлений до 230 – 800 Ом (по паспорту должно быть 1600 Ом \pm 10 %) после выявления неисправностей.

Расследование показало, что предохранительное устройство, предусмотренное конструкцией трансформаторов данного типа и представляющее собой плавкую вставку с характеристикой, представленной на рис. 2, во многих случаях не позволяет предотвратить повреждение ТН.

Следовательно, параметры токов (частота и амплитуда бросков, действующее значение, длительность протекания) в первичных обмотках ТН при развитии повреждений отличались от принятых при выборе параметров предохранителя. Причины такой ошибки связаны с тем, что расчёты по выявля-

нию опасных феррорезонансных схем для конкретных сетей 6 – 10 кВ выполнены не были, оценка параметров электромагнитных процессов, сопровождающих разряд ёмкости сети через заземлённые обмотки ТН с насыщением их магнитопровода в режимах ОЗЗ, не осуществлялась. Результаты исследования переходных процессов на компьютерной модели участков электрической сети показали, что при феррорезонансе среднеквадратическое значение тока в каждой фазе ТН не превышает значения 0,5 А для сети 6 кВ и 0,4 А для сети 10 кВ. Это означает, что порог срабатывания предохранителя (рис. 2) не будет достигнут даже при длительном ОЗЗ и периодических бросках первичного тока из-за насыщения ТН, которые приводят к перегреву высоковольтной обмотки ТН и пробоем межвитковой изоляции, перегоранию отдельных проволок обмотки.

По рекомендации завода-изготовителя, в целях исключения повреждения подобных ТН, нейтраль первичных обмоток, соединённая в звезду, была заземлена через три параллельно соединённых резистора сопротивлением 2,4 – 3,0 кОм и мощностью 100 Вт \pm 5 % каждый. Массовый выход из строя ТН прекратился, однако случаи их повреждения все же были, поскольку область применения указанной защитной меры ограничена из-за небольшой мощности, которую могут рассеять дополнительные низковольтные резисторы.

Инженерная оценка опасности возникновения группового феррорезонанса

В сетях 6 – 10 кВ рассматриваемого промышленного предприятия эксплуатируется большое число электромаг-

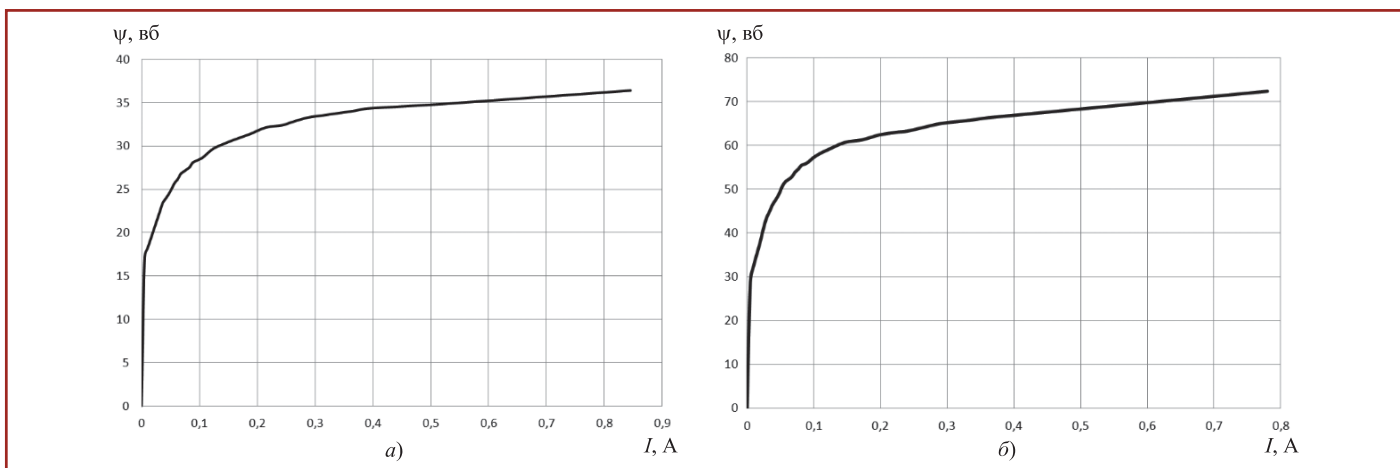


Рис. 3. Экспериментальные кривые намагничивания НТМИ-6 (а) и НТМИ-10 (б)

нитных ТН с заземлённой обмоткой фазы В, в основном — трансформаторы стандартной конструкции трёхфазного или однофазного исполнения типа НТМИ-10-66, ЗНОЛ-06-10, НОМ-10. Несмотря на то, что на некоторых участках сети (цеховых подстанциях) установлены ТН специальной антирезонансной конструкции типа НАМИ, наличие в той же сети электромагнитных ТН традиционной конструкции не исключает возможность возникновения ФРП при соблюдении определённых условий.

Инженерная оценка опасности возникновения группового феррорезонанса в сетях 6 – 10 кВ выполнена исходя из величины ёмкостного тока в расчёте на один типовой ТН электромагнитного типа и ранжируется по степени опасности применительно к доле ёмкостного тока в расчёте на один трёхфазный ТН (либо на один комплект однофазных ТН): «низкая» степень опасности соответствует ёмкостному току $I_C \geq 2,5$ А в расчёте на каждый ТН (А/ТН), «средняя» — $I_C = (1,5 \div 2,5)$ А/ТН; «высокая» — $I_C \leq 1,5$ А/ТН. В случае отключения части кабельных линий в соответствующей части сети при сохранении общего числа ТН доля ёмкостного тока в расчёте на один ТН будет снижаться: в первом случае при $I_C < 2,5$ А/ТН возникает вероятность развития неустойчивого самозатухающего ФРП; во втором — при $I_C < 1,5$ А/ТН появляется вероятность развития устойчивого незатухающего ФРП; в третьем — можно констатировать, что устойчивый ФРП будет возникать практически при любом замыкании на землю или коммутационных перенапряжениях, приводящих к повышению напряжения на обмотке ТН более чем на 30 %.

В табл. 1 приведены выделенные для расчёта участки сетей 6 – 10 кВ, где по приведённой инженерной оценке высокая вероятность возникновения устойчивого либо неустойчивого феррорезонанса. Наименования объектов изменены на условные, однако параметры

сетей сохранены. Значения ёмкостных токов получены в результате натурных измерений косвенным методом на основе рекомендации РД 34.20.179 [6] с применением цифрового осциллографа для регистрации сигналов тока через конденсатор и фазных напряжений.

Математическое моделирование феррорезонанса

Для решения задач, связанных с исследованием переходных процессов при феррорезонансе в сетях 6 – 10 кВ, целесообразно использовать современные системы компьютерного моделирования. Анализ значений токов и напряжений в сети проводился с использованием программного комплекса Matlab Simulink.

При расчётах ФРП важно правильно учесть параметры кривой намагничивания ТН [2]. К сожалению, вебер-амперные (вольт-амперные) характеристики ТН в паспортных данных не приводятся, поэтому предпочтительным вариантом является использование результатов экспериментального определения кривой намагничивания с учётом насыщения магнитопровода ТН. В настоящем исследовании использованы результаты натурного измерения параметров трансформаторов типа НТМИ-6 и НТМИ-10 [4], экспериментальные вебер-ампер-

ные характеристики указанных ТН для расчёта приведены на рис. 3 [7].

В расчётах электромагнитных процессов принята модель ненагруженного ТН, хотя отмечается, что при нагрузке НТМИ-6 (10) более 120 В·А наблюдается подавление ФРП [8]. Тем не менее, допущение корректно, поскольку, во-первых, число ТН в рассматриваемой сети достаточно велико, а во-вторых, при известной ёмкости сетей 6 – 10 кВ (табл. 1) эффект демпфирования феррорезонансных колебаний за счёт нагрузки вторичных обмоток ТН будет выражен слабо. Наиболее распространённая причина возникновения резонансных процессов с ТН — дуговое ОЗЗ: это условие использовано при моделировании ФРП в сетях 6 – 10 кВ промышленного предприятия, принятых в качестве объекта исследования.

При исследовании ФРП в кабельных сетях промышленного предприятия используется комбинированная модель горения однофазной дуги, основанная на гипотезах В. Петерсена и Н. Н. Белякова (в соавторстве с Ч. М. Джуварлы). Согласно первой зажигание дуги происходит в момент максимума напряжения на фазе, а гашение — при переходе через ноль тока в дуге, в котором преобладает высокочастотная составляющая.

Таблица 1

Участки сетей 6 – 10 кВ со средней и высокой вероятностью возникновения ФРП

Наименование объекта (условное)	Секция шин	Суммарный I_C , А	Число ТН	I_C на один ТН, А	Оценка опасности ФРП
ГПП-6, 6 кВ	1	7,53	5	1,51	высокая
	2	3,10	3	1,03	высокая
	3	11,9	5	2,38	средняя
ГПП-6, 10 кВ	7	7,34	3	2,45	средняя
ГПП-7, 10 кВ	2	2,15	1	2,15	средняя
ГПП-8, 10 кВ	1	2,98	2	1,49	высокая
ГПП-9, 10 кВ	2	1,66	2	0,83	высокая
	3	1,95	2	0,98	высокая
ГПП-10, 10 кВ	1	4,57	3	1,52	высокая
	2	2,97	3	0,99	высокая

По второй гипотезе исход гашения дуги в месте однофазного замыкания определяется путём сравнения напряжения, восстанавливающегося после гашения дуги, и напряжения электрической прочности дугового промежутка. Дуга пытается погаснуть при каждом переходе полного тока через ноль с учётом собственных колебаний контуров с малыми потерями. Однако восстанавливающееся напряжение сначала превышает электрическую прочность, при этом происходят кратковременные «клевки» повторных зажигания до тех пор, пока напряжение, восстанавливающееся на дуге после её погасания, не станет меньше электрической прочности дугового промежутка [7, 9].

Компьютерное моделирование переходных процессов при дуговых ОЗЗ в сетях 6 – 10 кВ промышленного предприятия выполняется с использованием двух описанных гипотез, обеспечивающих получение незаниженных уровней перенапряжений при дуговом ОЗЗ: зажигание и погасание дуги происходит в максимум фазного напряжения, избыточный заряд на нейтрали не успевает стечь через естественную проводимость изоляции в бестоковую паузу, продолжительность которой определяется режимом заземления нейтрали и для изолированной нейтрали составляет всего 10 – 20 мс. Активная эквивалентная проводимость изоляции сети относительно земли принята равной 3 % от ёмкостной. Существенное влияние на результаты расчётов оказывает величина напряжения на шинах: его увеличение и уменьшение приводит к соответствующим изменениям в области существования феррорезонанса в пределах примерно 10 %.

Расчётная схема замещения сетей 6 – 10 кВ для моделирования дугового ОЗЗ, являющегося условием возникновения ФРП, приведена на рис. 4. Питающий трансформатор 110 кВ представлен фазной индуктивностью рассеяния L_u , активным сопротивлением R_u и источником ЭДС (E_a , E_b , E_c). Сеть представлена сосредоточенными фазной C_ϕ и междуфазной $C_{мф}$ ёмкостями; R_n — высокоомный резистор, предназначенный для ограничения перенапряжений и срыва ФРП, сопротивление заземляющей дуги показано как R_d .

В качестве примера для детализированного расчёта рассматриваются два участка сетей: ГПП-6 1СШ 6 кВ и ГПП-8 1СШ 10 кВ. На рис. 5 и 6 показаны характерные компьютерные осциллограммы феррорезонансных колебаний, развивающихся после гашения однофазной дуги в цикле однократного зажигания и гашения заземляющей дуги. Расчётные значения амплитуды первичного тока в ТН в среднем в 10 – 15 раз превышают длительно допустимые токи.

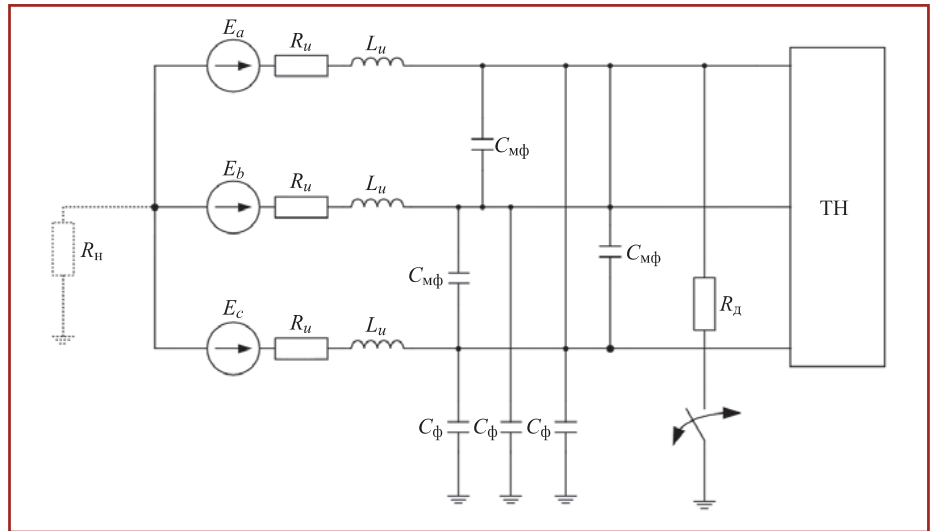


Рис. 4. Схема замещения сети для моделирования феррорезонансных процессов при дуговых замыканиях на землю

В расчётах уровни перенапряжений при дуговом ОЗЗ в сетях 6 – 10 кВ оцениваются как $u_{фmax}/u_\phi$, где $u_{фmax}$ — максимальное значение напряжения в переходном процессе; определялось из амплитудных значений перенапряжений на фазах В и С при дуговом ОЗЗ на фазе А; u_ϕ — амплитуда наибольшего рабочего фазного напряжения, в расчётах принята равной 5,87 кВ ($U_{max} = 7,2$ кВ) для сети 6 кВ и 9,8 кВ ($U_{max} = 12$ кВ) для сети 10 кВ. Также по осциллограммам оценивается значение $I_{ТНmax}$ — наибольшая амплитуда первичного тока в одной из фаз ТН.

Расчёты на модели качественно подтверждают результаты инженерной оценки опасности возникновения феррорезонанса (табл. 1). Таким образом, возникновение группового ФРП при дуговых замыканиях на землю возможно в широком диапазоне ёмкостных токов — от долей до единиц ампер на один ТН, в зависимости от параметров вебер-амперной характеристики, т. е. марки стали магнитопровода ТН, и мощности активных потерь в сети.

Меры подавления феррорезонанса

Любые виды феррорезонанса в сетях 6 – 10 кВ, особенно инициированные дуговыми ОЗЗ, опасны развитием аварийных ситуаций в сети. За счёт импульсных ($u_{фmax}/u_\phi \geq 2,5 \div 3,0$) и квазистационарных ($u_{фmax}/u_\phi = 1,8 \div 2,0$) перенапряжений возможны повреждения трансформаторов напряжения, а также пробой статорной изоляции электродвигателей и, реже, кабельных линий. Это приводит к двойным замыканиям с отключением фидеров, что срывает условия феррорезонанса и «спасает» ТН в сети с изолированной нейтралью. В сети с дугогасящими реакторами и резисторами в нейтрали повреждения ТН отсутствуют, поскольку

при заземлённой нейтрали условий возникновения феррорезонанса нет.

Для защиты электромагнитных ТН от сверхтоков и ликвидации условий возникновения ФРП возможно использование следующих схемных решений: заземление нейтрали первичных обмоток ТН через резисторы, включение резисторов в обмотку ТН со схемой «разомкнутый треугольник», включение высокоомных резисторов в фазы между питающей сетью и первичными обмотками ТН, применение антирезонансных электромагнитных ТН, применение ёмкостных ТН. Однако эти меры, за исключением двух последних, приводят к ухудшению метрологических характеристик измерительных трансформаторов и не являются универсальными, поскольку служат для борьбы со следствием феррорезонанса, а не с причиной.

Включение низковольтного резистора 5 – 25 Ом (реже 50 – 60 Ом) в схему «разомкнутого треугольника» обмоток ТН приводит к росту сопротивления ветви намагничивания при насыщении, поэтому она эффективна лишь в случае очень малых ёмкостей сети на землю ($I_C \leq 0,013 \div 0,08$ А) и «не работает» при несимметрии кривых намагничивания ТН по фазам порядка 20 % [10]. Длительное подключение вторичных резисторов сопротивлением менее 25 Ом на практике не применяется. Учитывая, что диапазон изменения вебер-амперной характеристики метрологически исправного ТН может достигать 15 – 20 % относительно «базовой» кривой намагничивания, логично заключить, что использование вторичных резисторов непригодно для защиты ТН от группового феррорезонанса в промышленных сетях с большими ёмкостными токами и разными типами ТН.

Исключить феррорезонанс можно благодаря применению антирезонансных ТН, насыщения которых не происходит

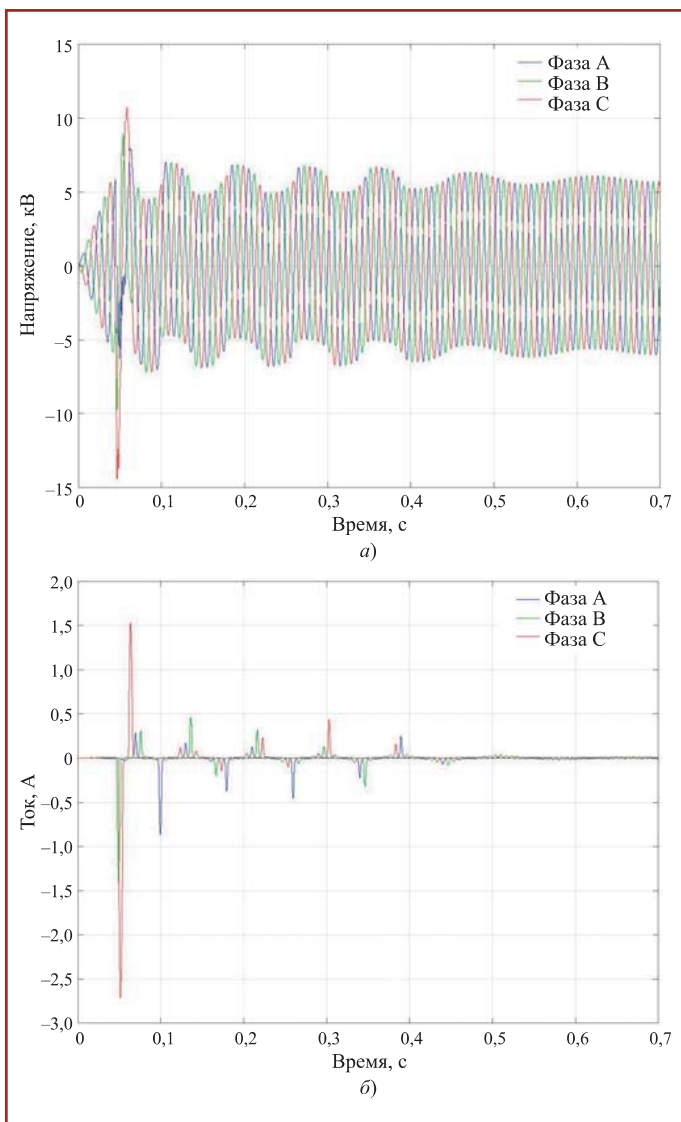


Рис. 5. Компьютерные осциллограммы напряжений (а) [$u_{\Phi_{max}}/u_{\Phi} = 2,46$] и токов в первичных обмотках ТН (б) [$I_{ТН_{max}} = 2,71$ А] при неустойчивом групповом феррорезонансе в сети 6 кВ, 1 СШ ГПП-6 с изолированной нейтралью (суммарный $I_C = 7,53$ А, пять ТН)

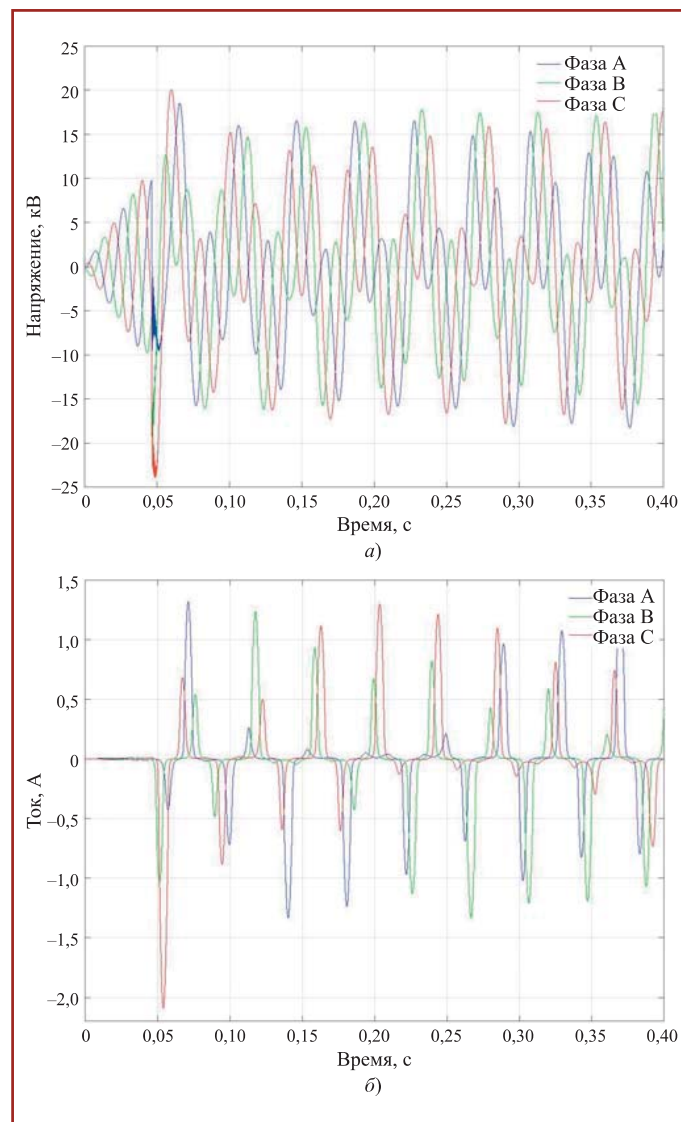


Рис. 6. Компьютерные осциллограммы напряжений (а) [$u_{\Phi_{max}}/u_{\Phi} = 2,44$] и токов в первичных обмотках ТН (б) [$I_{ТН_{max}} = 2,09$ А] при неустойчивом групповом феррорезонансе в сети 10 кВ, 1 СШ ГПП-8 с изолированной нейтралью (суммарный $I_C = 2,98$ А, два ТН)

даже в режимах ОЗЗ [11]. Это достигается за счёт разных способов: частичного использования в магнитопроводе конструкционной стали с повышенными потерями на гистерезис, трёхстержневой конструкцией магнитопровода с дополнительной замкнутой накоротко компенсационной обмоткой, путём включения между нейтральной точкой соединения обмоток и землёй дополнительного трансформатора нулевой последовательности с реактивным сопротивлением 300 – 600 кОм или активного сопротивления 800 – 1000 Ом.

Эффективность внедрения таких ТН снижается при наличии в одной и той же сети измерительных трансформаторов разного типа, в том числе насыщаемых. К сожалению, повреждение антирезонансных ТН при длительных дугowych замыканиях на землю в сети не исключается полностью, а некоторые из них также подвержены эффекту «ложной земли». Универсальное техническое решение для ликвидации условий разви-

тия ФРП и исключения повреждения электромагнитных ТН — заземление нейтрали сети, в том числе через резисторы.

Энергия, запасённая в нелинейной индуктивности ТН при заданном потокоцеплении, численно равна площади между осью ординат и кривой намагничивания, поэтому, чем ниже кривая намагничивания, тем большие активные потери следует ввести в резонансный контур для срыва колебаний. Дополнительные расчёты показали, что в сетях 6 – 10 кВ срыв устойчивого группового ФРП наблюдается уже при включении в нейтраль резистора R_n сопротивлением единицы и десятки килоом: меньшие значения соответствуют ликвидации нелинейных колебаний, большие — переходу в затухающий процесс длительною примерно до 100 мс после обрыва тока дуги. Строго говоря, выбор сопротивления резистора в нейтрали выполняется на основе нескольких критериев, главными из которых являются

ограничение перенапряжений при последовательных дугowych ОЗЗ и повышение чувствительности релейных защит от замыканий на землю для конкретной сети [4, 9]. Выбранный по этим условиям резистор гарантированно обеспечит подавление любых резонансных процессов в контуре нулевой последовательности.

Значения необходимого сопротивления резистора в нейтрали для срыва ФРП в рассматриваемых сетях 6 – 10 кВ, рассчитанные на компьютерной модели сети в программном комплексе MATLAB Simulink, приведены в табл. 2. Осциллограммы напряжения и тока в обмотках ТН при включении в нейтраль резистора в сетях 6 – 10 кВ, на примере ГПП-6 и ГПП-8, приведены на рис. 7 и 8. Поскольку в качестве условия «запуска» феррорезонанса выступает однократный дуговой пробой фазы на землю, расчётные уровни перенапряжений даже в сети с изолированной нейтралью не превышают 2,6

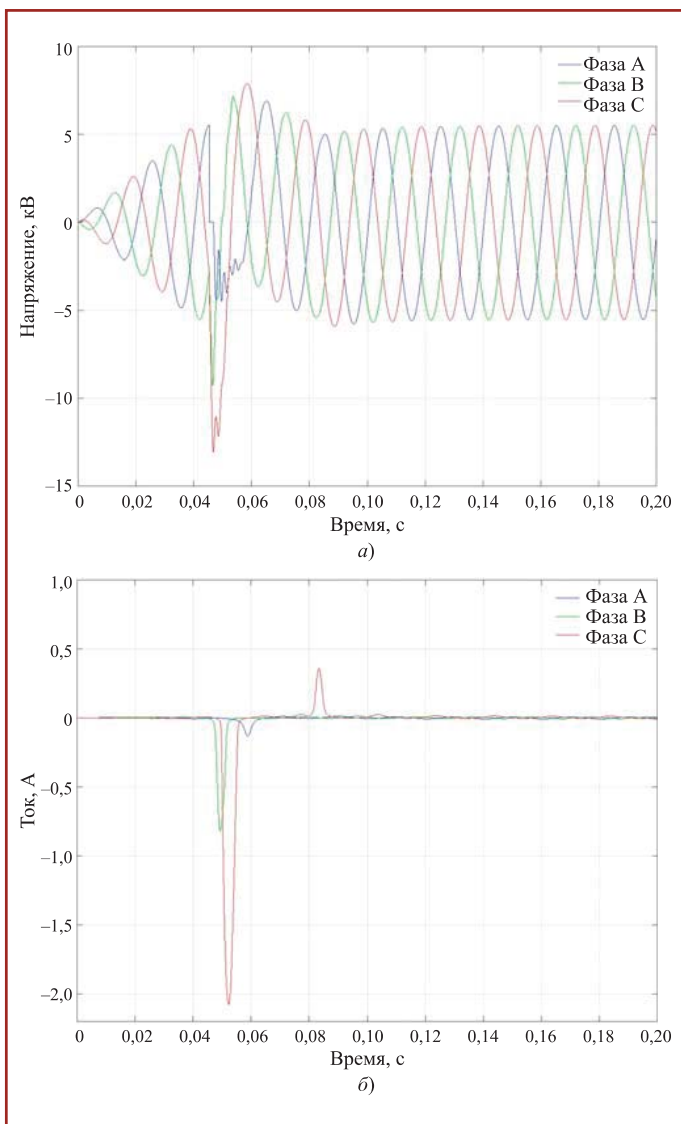


Рис. 7. Компьютерные осциллограммы напряжений (а) [$u_{Ф\max}/u_{Ф} = 2,22$] и токов в первичных обмотках ТН (б) [$I_{ТН\max} = 2,07 А$] в сети 6 кВ, ТЩ ГПП-6 с резистивным заземлением нейтрали ($R_n = 2 \text{ кОм}$)

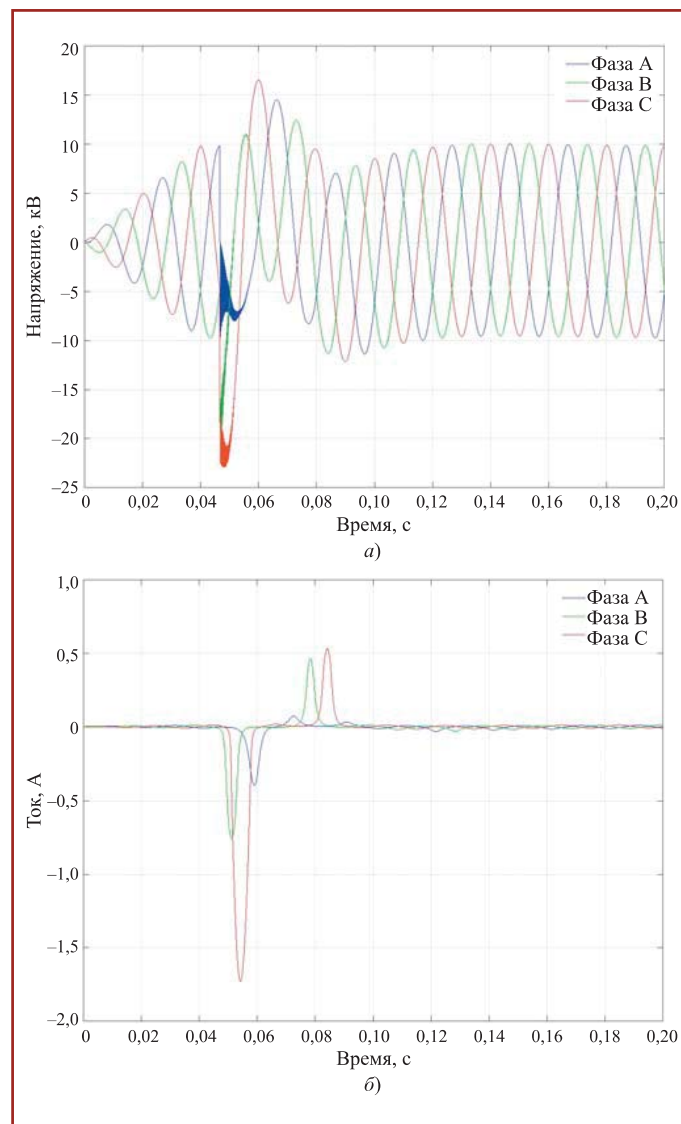


Рис. 8. Компьютерные осциллограммы напряжений (а) [$u_{Ф\max}/u_{Ф} = 2,34$] и токов в первичных обмотках ТН (б) [$I_{ТН\max} = 1,73 А$] в сети 10 кВ, ТЩ ГПП-8 с резистивным заземлением нейтрали ($R_n = 12,5 \text{ кОм}$)

отн. ед. и снижаются в пределах 10 % при включении резистора с расчётным сопротивлением, необходимым для устранения ФРП.

Расчёты электромагнитных процессов с использованием компьютерной модели нескольких участков сетей 6 – 10 кВ показали, что достаточным для срыва группового ФРП и полной ликвидации нелинейных колебаний является сопротивление резистора в нейтрали $R_n = 1,5 \div 10 \text{ кОм}$ в сети 6 кВ и $5,5 \div 19 \text{ кОм}$ в сети 10 кВ. Ранее выполненные на основе натуральных осциллограмм исследования [3], а также дополнительные расчёты подтвердили, что устранение нелинейных колебаний ФРП достигается при отношении активного тока резистора к ёмкостному току участка сети $I_R/I_C = 0,1 \div 0,2$ (значение 0,23 для первой строки табл. 2 в терминах математической статистики является «выбросом»). Применение резисторов исключает опасность возникновения ФРП вне зависимости от сочетания парамет-

ров сети, что подтверждается указаниями СТО 56947007-29.240.10.191-2014 [12].

По условиям ограничения перенапряжений и обеспечения нормативной чув-

ствительности токовой защиты нулевой последовательности на отходящих фидерах РП в прилегающей сети (с учётом изменения её конфигурации) оптимальным вариантом является использование

Таблица 2

Результаты компьютерного моделирования группового феррорезонанса в сетях 6 – 10 кВ промышленного предприятия

Наименование объекта	Секция шин	$I_C, А$	Число ТН	$u_{Ф\max}/u_{Ф}$ в сети без резистора, отн. ед.	$I_{ТН}, А$	Характер ФРП	Сопротивление резистора для срыва ФРП, кОм
ГПП-6, 6 кВ	1	7,53	5	2,46	2,71	±	2,0
	2	3,10	3	2,40	2,17	+	10
	3	11,9	5	2,51	3,18	±	1,5
ГПП-6, 10 кВ	7	7,34	3	2,52	2,42	±	5,5
ГПП-7, 10 кВ	2	2,15	1	2,42	2,42	±	18
ГПП-8, 10 кВ	1	2,98	2	2,44	2,09	+	12,5
ГПП-9, 10 кВ	2	1,66	2	2,38	1,57	+	19
	3	1,95	2	2,39	1,73	+	16
ГПП-10, 10 кВ	1	4,57	3	2,48	2,11	+	8,5
	2	2,97	3	2,46	1,77	+	10

Примечание: Устойчивый ФРП отмечен как «+», неустойчивый, затухающий за время больше 100 мс — как «±».

высокоомных резисторов, которые рассчитаны на длительную работу. Последнее условие связано с тем, что в сетях 6 – 10 кВ промышленных предприятий допускается режим удержания замыкания на землю до 2 ч без отключения потребителей на время оперативных переключений. Выполненные на компьютерной модели исследования и расчёт уставок релейной защиты от ОЗЗ позволили определить оптимальные параметры резисторов для рассматриваемых участков кабельной сети предприятия: необходимое активное сопротивление для сети 6 кВ оказалось в 4,30 – 11,1 раза, а для сети 10 кВ — в 6,5 – 8,5 раз ниже тех сопротивлений, которые требуются для ликвидации условий ФРП.

Заключение

1. Исследование условий возникновения феррорезонанса позволяет констатировать, что проблема выхода из строя электромагнитных трансформаторов напряжения остаётся актуальной не только для сетей с малыми ёмкостными токами, но и для развитых кабельных сетей промышленных предприятий и связана с использованием большого числа старых ТН в эксплуатации, ошибками при проектировании, а также сохранением режима изолированной нейтрали.

2. Анализ реальных случаев повреждения ТН с литой изоляцией и документация на данные трансформаторы показал, что выбор параметров предохранительных устройств обычно выполняется без расчётов электромагнитных процессов с учётом параметров конкретной сети, где будут применяться ТН. Одна из причин аварийных событий — конструктивно-технологические особенности ТН с литой полимерной изоляцией, допускающие воздушные включения между обмоткой высшего напряжения и корпусом аппарата. До появления ГОСТ 1983–2015, устанавливающего требования по испытаниям литых ТН на частичные разряды, указанные дефекты не выявлялись в рамках заводских испытаний.

3. На основе соотношения числа ТН и ёмкостного тока участка сети, где они установлены, предложен простой критерий для инженерной оценки опасности феррорезонанса в сетях 6 – 10 кВ. По предварительной оценке при ёмкостном токе до 1,5 А на один трёхфазный ТН (комплект однофазных ТН) опасность возникновения устойчивого ФРП максимальна, а при токах более 2,5 А вероятность его развития близка к нулю. На компьютерной модели различных участков сетей промышленного предприятия выполнены расчёты, подтверждающие корректность этого критерия.

4. Изучены конструктивные и схемно-режимные мероприятия, позволяющие исключить развитие ФРП в электрических сетях. Наиболее эффективные меры ликвидации феррорезонанса: а) применение специальных конструкций ТН, исключающих возможность их насыщения в различных режимах эксплуатации; б) изменение режима нейтрали сети и применение силовых резисторов.

5. Для срыва ФРП и полной ликвидации нелинейных колебаний необходимым и достаточным является такое сопротивление резистора в нейтрали, которое обеспечивает отношение активного тока резистора к ёмкостному току участка сети $I_R/I_C = 0,1 \div 0,2$ в зависимости от параметров конкретной сети. Для полноценной защиты оборудования сопротивление резистора следует выбирать по критериям ограничения перенапряжений и повышения чувствительности токовой защиты нулевой последовательности. В этом случае значение сопротивления оказывается примерно в 4 – 10 раз ниже, чем необходимо только для устранения феррорезонанса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жежеленко И. В., Короткевич М. А. Электромагнитная совместимость в электрических сетях: учеб. пособие. — Минск: Высшая школа, 2012. — 197 с.
2. Эткин Л. Л. Защита трансформаторов напряжения в сетях 3 – 35 кВ. Необходимо изменить режим заземления

нейтрали // Новости электротехники. 2003. № 5(23).

3. Ширковец А. И. Классификация замыканий на землю и оценка устойчивости сети к феррорезонансу на основе результатов регистрации аварийных событий // Релейная защита и автоматизация. 2013. № 3. С. 26 – 30.

4. Электрооборудование высокого напряжения нового поколения. Основные характеристики и электромагнитные процессы: монография / К. П. Кадомская, Ю. А. Лавров, О. И. Лаптев. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. — 343 с.

5. ГОСТ 1983–2015. Трансформаторы напряжения. Общие технические условия. — М.: Стандартинформ, 2016. — 26 с.

6. РД 34.20.179 (ТИ 34-70-070–87). Типовая инструкция по компенсации ёмкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6 – 35 кВ. — М.: ЦЕНТРАМАГ, 2019. — 48 с.

7. Математическое моделирование и перенапряжения в электрических сетях 6 ... 35 кВ / А. П. Заболотников, К. П. Кадомская, А. А. Тихонов. — Новосибирск, 1993. — 158 с.

8. Саенко Ю. Л., Попов А. С. Исследование феррорезонансных процессов с учетом варьирования вебер-амперной характеристики трансформаторов напряжения. <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/15992/1/22-Saenko-123-132.pdf>.

9. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них: учебник / К. П. Кадомская, Ю. А. Лавров, А. А. Рейхердт. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. — 368 с.

10. Ferroresonance processes in electrical networks caused by saturation of voltage-transformer cores / K. Kadomskaya, A. Ivanov, O. I. Laptev // Proc. on IEEE Russia Power Tech. 2005, pp. 1 – 4.

11. Лаптев О. И., Лавров Ю. А. Современные антирезонансные трансформаторы напряжения // // Новости электротехники. 2009. № 5(59). С. 32 – 35.

12. СТО 56947007-29.240.10.191–2014. Методические указания по защите от резонансных повышений напряжения в электроустановках 6 – 750 кВ. http://www.fsk-ees.ru/about/management_and_control/test/STO_56947007-29.240.10.191-2014.pdf.

ПОДПИСКА

Цены на подписку через редакцию на второе полугодие 2019 г.

115280, Москва,
3-й Автозаводский проезд, 4, корп. 1.
Тел. +7 (495) 234-74-21.
energetick@mail.ru

Наименование издания	Подписной индекс	Цена одного экземпляра без почтовых расходов в рублях	
		без НДС	с НДС
Энергетик	71108	1280,00	1408,00
Библиотека электротехника	88983	790,00	869,00
Энергетика за рубежом	87261	695,00	764,50